

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Syntetická vlákna jako prostředek pro zlepšení vlastností zemin

Synthetic Fibers as a Mean to Improve the Properties of Soils

Student:

Adam Voltr

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Adam Voltr**

Studijní program:

B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor:

3647R017 Geotechnika

Téma:

Syntetická vlákna jako prostředek pro zlepšení vlastností zemin  
Synthetic Fibers as a Means to Improve the Properties of Soils

Zásady pro vypracování:

1. Úvod (předtím abstrakt (česky, anglicky), definice řešené problematiky)
2. Vývoj syntetik jako prostředek pro zlepšení vlastností zemin, zkušenosti z ČR a zahraničí
3. Laboratorní měření vlastností směsí (použití PS, sledování změn pórovitosti), případně modelování napětí-o-deformačních stavů pomocí matematického modelování (Geo5) vybraných směsí
4. Vyhodnocení dosažených výsledků
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

[www.fast.vsb.cz/lahuta](http://www.fast.vsb.cz/lahuta)

ČSN P ENV 1997-3 EUROKÓD 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 1: Obecná pravidla  
ČSN 73 1001 1987- Základová půda pod plošnými základy

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta**

Datum zadání: 31.10.2011

Datum odevzdání: 30.04.2012



doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Darja Kubečková Skulinová, Ph.D.  
děkanka fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu  
s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

## **Anotace**

Používání syntetických vláken je relativně nový způsob vyztužování zemin. Informace k této problematice lze získat především ze zahraničních zdrojů s využitím klíčových slov “random reinforcement“ - rozptýlená výztuž, “fibre reinforcement“ – vláknitá výztuž.

Zlepšení zeminy s nevyhovujícími vlastnostmi spočívá v přimíchání krátkých syntetických vláken, délky 10-100 mm. Jako výsledek se očekává zvýšení smykové pevnosti i celkové zvýšení únosnosti nově vzniklého kompozitního materiálu.

Tato práce prezentuje postup a výsledky výzkumu prováděného v geotechnické laboratoři Katedry geotechniky a podzemního stavitelství na fakultě stavební VŠB-TU Ostrava. Ke zkouškám byla použita zemina a PET vlákna délky 70 mm dodána Ing. Rubišarovou Ph.D.

**Klíčová slova:** rozptýlená výztuž, vláknitá výztuž

## **Annotation**

The use of synthetic fibers is relatively new way for soil reinforcing. Information about this issue can be obtained mainly from foreign sources with using this key words: „random reinforcement“ and „fibre reinforcement“.

Improving soils with unstable properties is in the mixed of short fibers of 10 – 100mm length. As the result is expected to increase shear strength and the overall increase of bearing capacity of the newly formed composite material.

This thesis represent the progress and results of research performed in geotechnical laboratory of Geotechnics and underground buildings department in Faculty of civil engineering VŠB – TU Ostrava. For testing was used the soil and PET fibers of lenght 70 mm given by Ing. Rubanišarová Ph.D.

**Key words:** random reinforcement, fibre reinforcement

## **Obsah**

<b>Seznam použitého značení .....</b>	<b>1</b>
<b>1.Úvod .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Vývoj syntetik .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Laboratorní měření vlastností směsí .....</b>	<b>6</b>
3.1. Materiály .....	6
3.1.1 Zemina .....	6
3.1.2 Vlákná .....	11
3.2. Proctorova zkouška zhutnění .....	12
3.3. Oedometrická zkouška stlačitelnosti .....	18
3.4. Smyková krabicová zkouška .....	26
<b>4.Vyhodnocení dosažených výsledků .....</b>	<b>30</b>
4.1 Proctorova zkouška zhutnění .....	30
4.2 Oedometrická zkouška .....	30
4.3 Smyková krabicová zkouška .....	30
<b>5. Závěr .....</b>	<b>31</b>
<b>Seznam použité literatury a informačních zdrojů: .....</b>	<b>32</b>
<b>Seznam obrázků: .....</b>	<b>34</b>
<b>Seznam tabulek : .....</b>	<b>35</b>
<b>Seznam grafů: .....</b>	<b>37</b>
<b>Poděkování : .....</b>	<b>38</b>

## Seznam použitého značení

A - Plocha [ $\text{m}^2$ ]

$C_c$  - Součinitel křivosti

$C_u$  - Součinitel nestejnorodosti

ČSN - Česká technická norma

$E_{\text{oed}(+)}$  - Oedometrický modul přetvárnosti [MPa]

$E_{\text{oed}(-)}$  - Oedometrický modul pružnosti [MPa]

PET - Polyester (Polyethylentereftalát)

PS - Proctor Standart (proctorova zkouška zhutnění)

N - Normálová síla na smykové ploše [KN]

T - Smyková síla na smykové ploše [KN]

c - Soudržnost [KPa]

$d_{10}$  - Průměr zrn příslušející pořadnici u 10 % propadu z celkové navážky [mm]

$d_{30}$  - Průměr zrn příslušející pořadnici u 30 % propadu z celkové navážky [mm]

$d_{60}$  - Průměr zrn příslušející pořadnici u 60 % propadu z celkové navážky [mm]

h - Výška [m]

m - Hmotnost [kg]

n - Pórovitost [%]

w - Měrná vlhkost [%]

$\gamma$  - Objemová tíha přirozeně vlhké zeminy [ $\text{KN/m}^3$ ]

$\Delta h$  - Rozdíl výšky [mm]

$\varepsilon$  - Poměrné přetvoření

$\rho_d$  - Objemová hmotnost vysušené zeminy [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_{s,z}$  - Měrná hmotnost zeminy [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_{s,\text{pet}}$  - Měrná hmotnost vláken [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\sigma$  - Normálové napětí na smykové ploše [KPa]

$\tau$  - Smykové napětí na smykové ploše [KPa]

$\varphi$  - Úhel vnitřního tření [ $^\circ$ ]

## 1.Úvod

Dnešní společnost klade velkou váhu na ochranu životního prostředí. Stavebnictví, jako každé další průmyslové odvětví, by se k této otázce mělo stavět zodpovědně. V geotechnice je jednou z možností využití rozptýlené syntetické výztuže. Mikro-výztuž, jak se tato metoda může také nazvat, je zajímavé alternativní řešení pro zlepšení vlastností jemnozrnných materiálů. Využití recyklovaného materiálu určitě prokáže i příznivý vliv na ekonomickou stránku výstavby.[2]

Vláknitou výztuž je vhodné využívat u jemnozrnných a písčitých zemin. Jelikož průměr vláken výrazně nepřesahuje velikost zrn v zemině. Předpokládá se, že ve štěrkových zeminách vlákna nebudou mít vliv na jejich mechanické vlastnosti, a proto se s nimi u vyztužování takovýchto zemin nepočítá.[9]

Možné varianty použití rozptýlené výztuže [2]:

- konstrukce náspů
- redukce trhlin ve svrchní vrstvě konstrukce
- zásypy mostních pilířů
- snížení zemních tlaků od zemních konstrukcí
- protierozní opatření



## 2. Vývoj syntetik

Vyztužené zeminy se vyskytují v přírodě a je to také velmi stará technika používaná našimi dávnými předky. Kořeny stromů a jiných rostlin chrání říční břehy proti působení eroze, dokonce i některá zvířata využívají zeminy v kombinaci s klacíky ke stavbě svých obydlí. Vegetace je využívána dlouhý čas ke zlepšení stability svahů. Hliněné cihly s rákosem nebo slámou jsou popisovány v Bibli. Babyloňané používali vyztužené zeminy ke stavbě svých svatyní, “Zikuratů”, již před více než 3000 lety. Některé části Velké Čínské zdi, která je starší než 2000 let, jsou postaveny ze směsi hlíny a šterku vyztužené větvemi tamaryšku. Římané používali zeminu vyztuženou různými materiály, jako rákos nebo svazky větví.[1]

Nejstarší známou antickou stavbou, kde byla použita rozptýlená výztuž je zikkurat v Dur-Kurigalzu (Obr.1), který stojí přibližně 30 km západně od dnešního Bagdádu. Je postaven z hliněných cihel tloušťky od 130 mm do 400 mm, vyztužených rákosovými rohožemi a slámou. Byl zbudován mezi roky 1345 – 1324 př.n.l. a tyčí se do výšky cca 60 metrů. Za vlády Saddáma Hussajna bylo zrestaurováno první patro.[2]



*Obr. 1 - Zikkurat v Dur-Kurigalzu*

Přírodní materiály nebyly jako výztuž používány pouze v antických dobách. Touto metodou byly stavěny domy napříč časem. I v dnešních dobách nacházíme pozůstatky starých vesnic postavených z hlíny smíchané s rákosem, slámou nebo prasečími štětinami. Všechny přírodní materiály mají jednu velkou nevýhodu - biologický rozpad. [1]

Zmínky o zlepšování vlastností zemin při zemních pracích, se objevují v 19. století, ovšem je známo pouze malé množství informací. Za zmínku stojí příspěvek z roku 1822, kdy Britská armáda zavedla formu vyztužování zemin pro vojenské konstrukce, Pasley (1822). Na vyztužení použili chrástí, dřevěná prkna a plátno. Pravděpodobně je to historicky první zemní konstrukce vyztužená pomocí geotextilie, ačkoli měla nejspíš krátkou životnost. Použití geotextilie jako stálého vyztužení, nemohlo přijít dříve, než byly vyvinuty materiály na bázi syntetických polymerů. To přichází na přelomu 60. a 70. let minulého století. Od té doby se syntetické materiály postupně dostávají do geotechnické praxe. [3]

Metoda vyztužování zemin pomocí rozptýlené výztuže je po geotextiliích, geomřížích a geobuňkách další možností využití syntetik v geotechnice. Touto metodou se v uplynulých letech zabývalo několik zahraničních autorů. např. Fallorca, Pinto (2002, 2004, 2006); Michalowski, Čermák (2001, 2003); Bahar et al. (2002); Kumar et al (1999); McGown et al. (2004) a další. Není známo mnoho příkladů využití tohoto způsobu úpravy zemin v praxi. Články na toto téma se většinou zabývají výzkumem pomocí různých laboratorních zkoušek. Terénní zkoušky jsou většinou opomíjeny. [9]

V České Republice se výzkumem zabývala Ing. Rubišarová Ph.D., která do svého výzkumu zahrnula i terénní zkoušky. Jedna z nich bude popsána.

### **Terénní zkouška:**

Tato zkouška zde není uváděna z důvodu prezentace jejích výsledku, ale pouze jako názorný příklad aplikace rozptýlené výztuže. Zkouška byla provedena v srpnu 2008 v obci Velké Albrechtice nedaleko Ostravy. Zemina v oblasti zkoušky byla dle ČSN CEN ISO/TS 17892-4 klasifikována jako jíl písčitý (F4 CS). Bylo určeno, že koncentrace vláken ve vyztužené zemině bude 0,5%. [2]

Nejprve bylo nutno vytyčit si na vyztužovaném úseku pravidelný rastr o polích 1x1 m. Z půdorysného rozměru a hloubky záběru zemní frézy byla spočítána hmotnost vláken na jedno pole (Obr.2). Vlákna byla po poli rovnoměrně rozmístěna a pomocí traktoru a zemní frézy promíchána se zeminou (Obr.3). Vzniklá směs byla zarovnána nakladačem (Obr. 4) a celá plocha byla zhutněna vibračním válcem (Obr.5).



*Obr. 2 – Rozmístění vláken*



*Obr. 3 – Míchání vláken*



*Obr. 4 – Zarovnání zeminy*



*Obr. 5 – Hutnění zeminy*

### 3. Laboratorní měření vlastností směsí

#### 3.1. Materiály

##### 3.1.1 Zemina

Na všechny zkoušky byl použit materiál dodán Ing. Rubišarovou Ph.D. Ten byl odebrán z většího vzorku a byly známy výsledky zrnitostních prosévacích zkoušek. Bohužel tyto výsledky byly velice rozdílné a bylo nutné vykonat zrnitostní zkoušku pro konkrétní vzorek.

#### Zrnitostní prosévací zkouška

Postup zkoušky dle ČSN CEN ISO/TS 17892-4, zařídování dle ČSN EN ISO 14688-2

**Pomůcky:** laboratorní váha s přesností na tři desetinná místa, keramické váženky, sušárna, sada sít, mechanická prosévačka

**Postup zkoušky:** Z důvodu celkového malého množství vzorku bylo k vysušení odebráno přibližně 0,5 kg zeminy, která byla vysušena při 105 °C po dobu 48 hodin. Po vysušení ji bylo k dispozici 590g. Sada sít z kovové tkaniny byla sestavena takto : 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 . Pro větší přesnost byl vzorek proséván 2 krát 6 minut. [6] Propady na každém síti byly zváženy a zaznamenány. Výsledky jsou zpracovány v programu Microsoft Excel.

Velikost síta	Zůstatek na sítu (g)	Celkový propad(g)	Zůstatek na sítu (%)	Celkový propad (%)
16	0	589,34	0	100
8	28,21	561,13	4,79	95,21
4	69,06	492,07	11,72	83,49
2	69,4	422,67	11,78	71,71
1	69,05	353,62	11,72	59,99
0,5	74,38	279,24	12,62	47,37
0,25	86,48	192,76	14,67	32,7
0,125	132,73	60,03	22,51	10,19
0,063	50,18	9,85	8,52	1,67
0	9,85	0	1,67	0
Σ	589,34	/	100	/

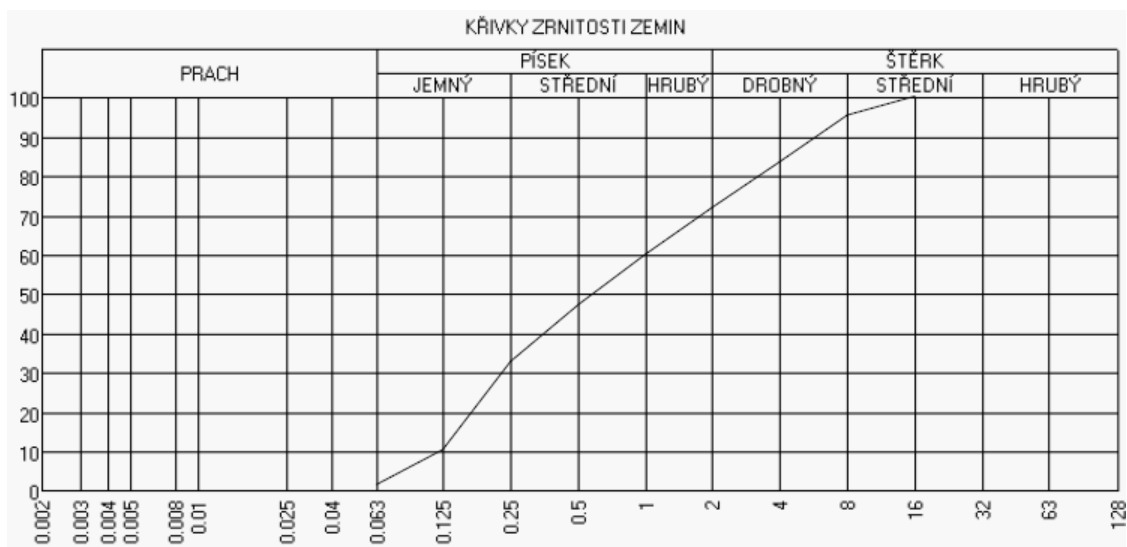
Tab. 1 – Výsledky prosévací zkoušky

Rozdíl mezi hmotností zkoušeného vzorku a hmotností zůstatku na sítích byl 0,66g (0,11%) , což je méně než 1%, takže zkouška je průkazná.

#### Zatřídění zeminy:

	Hmotnost [g]	Hmotnostní podíl [%]
Jemné částice	9,85	1,67
Písek	482,22	70,04
Štěrky	97,27	28,29

Tab. 2 – Zatřídění zeminy



Graf 1 – Křivka zrnitosti

$$d_{10} = 0,123 \text{ mm}$$

$$d_{30} = 0,223 \text{ mm}$$

$$d_{60} = 1 \text{ mm}$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = \frac{0,223^2}{0,123 \cdot 1} = 1,404 \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{1}{0,123} = 8,13$$

Dle zjištěných výsledků byla zemina zařazena jako S2 (SP-písek špatně zrněný). [4]

## Proctorova zkouška zhutnění

Z důvodu malého množství zeminy, nebylo možno udělat kompletní proctorovu zkoušku, proto považujeme za směrodatné výsledky dodané Ing. Rubišarovou Ph.D.

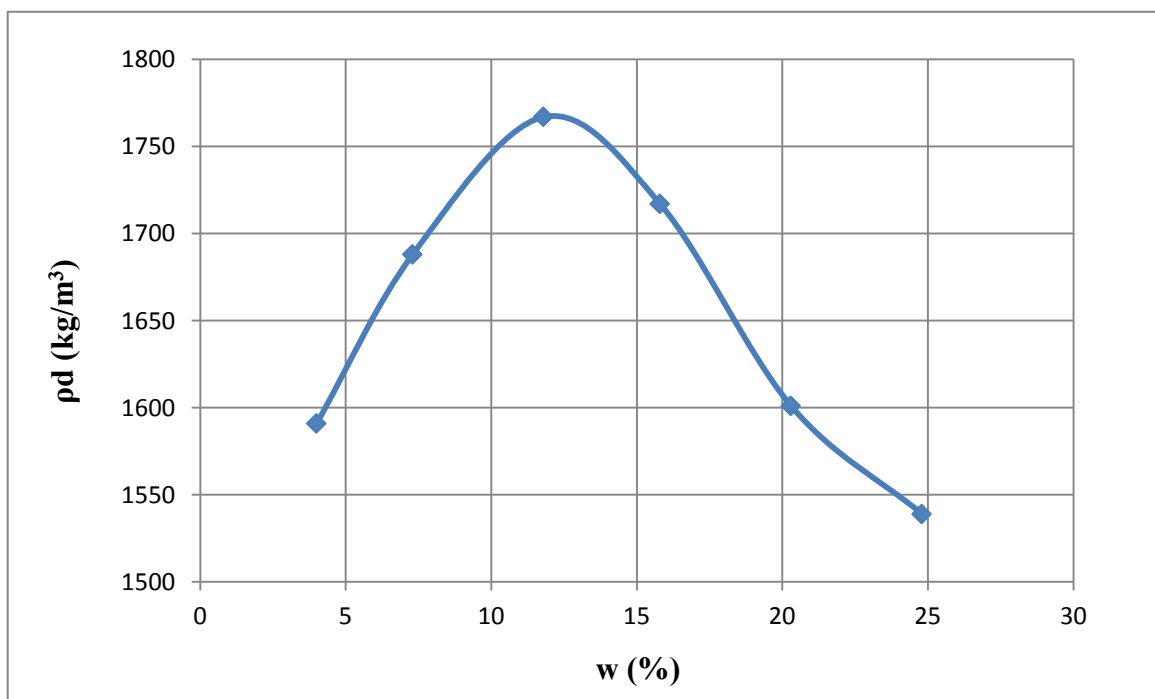
Naměřené hodnoty	w (%)	4	7,3	11,8	15,8	20,3	24,8
	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1591	1688	1767	1717	1601	1539

Tab. 3 – Výsledky kompletní proctorovy zkoušky

Z dosažených výsledků byl v programu Microsoft Excel zpracován graf. Dále byly určeny výsledky:

Optimální vlhkost:  $w = 12 \%$

Maximální objemová hmotnost suché zeminy:  $\rho_d = 1770 \text{ kg/m}^3$



Graf 2 – Výsledky kompletní proctorovy zkoušky zeminy

## Laboratorní určení vlhkosti

Postup zkoušky dle ČSN CEN ISO/TS 17892-1.

Cílem výzkumu bylo mimo jiné provést proctorovu zkoušku pro vzorky s různými obsahy vláken. Proto bylo nutné navlhčit vzorek na hodnotu ideální vlhkosti. Navlhčení bylo provedeno a výsledná vlhkost prověřena laboratorním určením vlhkosti.

**Pomůcky:** laboratorní váha s přesností na tři desetinná místa, keramické váženky, sušárna

**Postup zkoušky:** Pro dosažení větší přesnosti bylo měřeno 10 vzorků odebraných z různých míst uložené zeminy. Vzorky byly sušeny v sušárně po dobu 48 hodin při teplotě 105 °C. [5] Poté byly vzorky převáženy, výsledky zaznamenány a zpracovány do tabulky v programu Microsoft Excel.

**Příklad výpočtu (váženka č.81):**  $w = \frac{m_w - m_d}{m_d - m_b} \cdot 100 = \frac{24,046 - 23,108}{23,108 - 16,040} \cdot 100 = 13,272 \%$

číslo váženky	81.	82.	83.	84.	85.
$m_b$ [g]	16,04	14,943	15,718	15,069	17,322
$m_w$ [g]	24,046	22,535	21,812	21,995	29,532
$m_d$ [g]	23,108	21,666	21,172	21,234	28,266
$w$ [%]	13,3	12,9	11,7	12,3	11,57
číslo váženky	86.	87.	88.	89.	90.
$m_b$ [g]	15,635	16,25	16,344	16,041	16,383
$m_w$ [g]	23,433	27,409	24,806	28,787	30,303
$m_d$ [g]	22,553	26,275	23,927	27,5	29,064
$w$ [%]	13,04	11,3	11,59	11,23	9,77

Tab. 4 – Určení vlhkosti

( $m_b$  – hmotnost váženky,  $m_w$  – hmotnost váženky s vlhkou zeminou,  
 $m_d$  – hmotnost váženky se suchou zeminou,  $w$  – vlhkost zeminy)

Nejvyšší a nejnižší hodnoty nebyly do výpočtu zahrnuty a ze zbývajících 8 hodnot byla aritmetickým průměrem zjištěna hodnota vlhkosti 11,87%, což odpovídá požadované hodnotě 12 %.

## Stanovení měrné hmotnosti

Postup zkoušky dle Návodu k laboratorním cvičením z předmětu Mechanika hornin a zemin na FAST VŠB.

**Pomůcky:** laboratorní váha s přesností na tři desetinná místa, teploměr, pyknometry, vaříč, síto

**Postup zkoušky:** Nejprve byl zvážen čistý pyknometr ( $m_1$ ). Byl vysušen menší vzorek zeminy, přibližně 300g, ze kterého byl pomocí síta získán vzorek o maximální frakci 0,125 mm. Tímto vzorkem byl naplněn pyknometr do 1/3 výšky a převážen ( $m_2$ ). Pyknometr byl do 3/4 výšky zalit vodou a na vaříči uveden do mírného varu. Byl kladen důraz na to, aby voda nevěřela. Po 20ti minutách byl pyknometr doplněn destilovanou vodou a temperován na 20 °C. Doplněný pyknometr byl osušen a převážen ( $m_3$ ). Poslední měřenou hodnotou byla hmotnost pyknometru plného destilované vody ( $m_v$ ). [10]

### Vyhodnocení:

1.měření :

$$m_1 = 28,795\text{g}$$

$$m_2 = 42,407\text{g}$$

$$m_3 = 85,925\text{g}$$

$$m_v = 77,380\text{g}$$

$$V_1 = \frac{m_v - m_1}{\rho_v} = \frac{77,380 - 28,795}{0,9982} = 48,673 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{s1} = \frac{m_2 - m_1 \cdot \rho_v}{\rho_v \cdot V + m_2 - m_3} = \frac{(42,407 - 28,795) \cdot 0,9982}{0,9982 \cdot 48,673 + 42,407 - 85,925} = 2681 \text{ kg/m}^3$$

2.měření:

$$m_1 = 28,809\text{g}$$

$$m_2 = 47,441\text{g}$$

$$m_3 = 89,120\text{g}$$

$$m_v = 77,430\text{g}$$

$$V_2 = \frac{m_v - m_1}{\rho_v} = \frac{77,430 - 28,809}{0,9982} = 48,709 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{s2} = \frac{m_2 - m_1 \cdot \rho_v}{\rho_v \cdot V + m_2 - m_3} = \frac{(47,441 - 28,809) \cdot 0,9982}{0,9982 \cdot 48,709 + 47,441 - 89,120} = 2679 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{s,z} = \frac{\rho_{s1} + \rho_{s2}}{2} = \frac{2681 + 2679}{2} = 2680 \text{ kg/m}^3$$



### 3.1.2 Vlákna

Polyesterová staplová vlákna (PET) byla stejně jako zemina dodána Ing. Rubišarovou Ph.D. Ta je získala od již zaniklé firmy Kordana Nitra. Známý byly všechny vlastnosti vláken až na měrnou hmotnost.

#### Stanovení měrné hmotnosti

Postup zkoušky dle Návodu k laboratorním cvičením z předmětu Mechanika hornin a zemin na FAST VŠB.

**Pomůcky:** laboratorní váha s přesností na tři desetinná místa, teploměr, pyknometry, vaříč, pinzeta

**Postup zkoušky:** Nejprve byl čistý pyknometr zvážen ( $m_1$ ). Dále byl naplněn co největším množstvím vláken, tak aby nebyl problém s vložením zátky a opět zvážen ( $m_2$ ). Pyknometr byl doplněn destilovanou vodou, osušen a převážen ( $m_3$ ). Poslední měřenou hodnotou byla hmotnost pyknometru plného destilované vody ( $m_v$ ). [10]

#### Vyhodnocení:

##### 1. měření

$$\begin{aligned} m_1 &= 26,988\text{g} & V_1 &= \frac{m_v - m_1}{\rho_v} = \frac{78,620 - 26,988}{0,9982} = 51,725 \text{ cm}^3 \\ m_2 &= 29,435\text{g} \\ m_3 &= 79,191\text{g} & \rho_{s1} &= \frac{m_2 - m_1 \cdot \rho_v}{\rho_v \cdot V + m_2 - m_3} = \frac{(29,435 - 26,988) \cdot 0,9982}{0,9982 \cdot 51,725 + 29,435 - 79,191} = 1370 \text{ kg/m}^3 \\ m_v &= 78,620\text{g} \end{aligned}$$

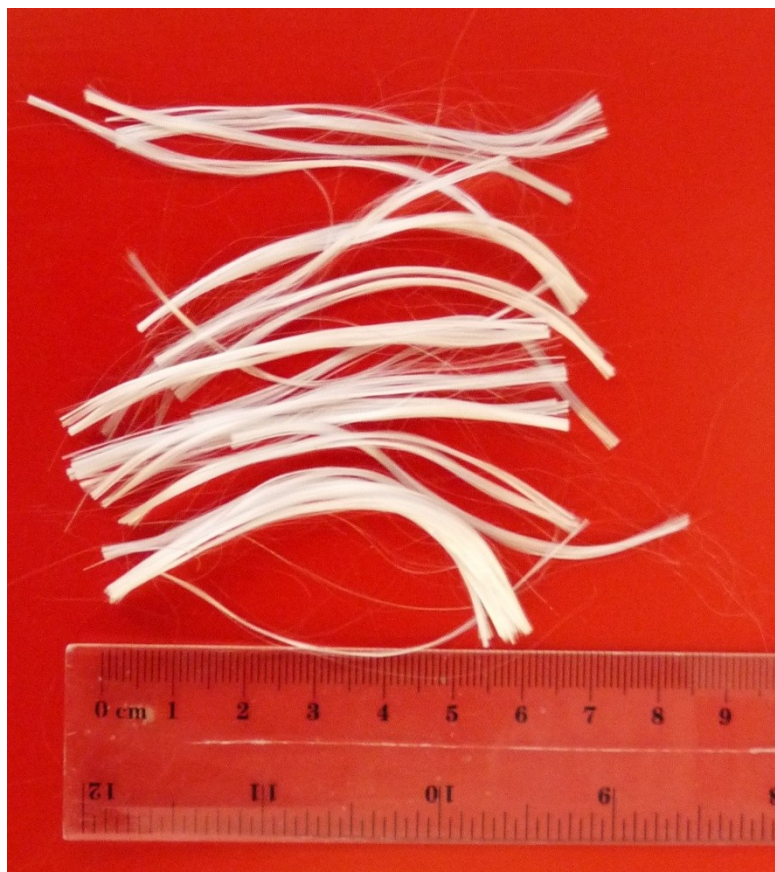
##### 2. měření

$$\begin{aligned} m_1 &= 26,987\text{g} & V_2 &= \frac{m_v - m_1}{\rho_v} = \frac{78,629 - 26,987}{0,9982} = 51,735 \text{ cm}^3 \\ m_2 &= 35,356\text{g} \\ m_3 &= 80,809\text{g} & \rho_{s2} &= \frac{m_2 - m_1 \cdot \rho_v}{\rho_v \cdot V + m_2 - m_3} = \frac{(35,356 - 26,987) \cdot 0,9982}{0,9982 \cdot 51,735 + 35,356 - 80,809} = 1351 \text{ kg/m}^3 \\ m_v &= 78,629\text{g} \end{aligned}$$

$$\rho_{s,\text{pet}} = \frac{\rho_{s1} + \rho_{s2}}{2} = \frac{1370 + 1351}{2} = 1361 \text{ kg/m}^3$$

Délková hustota [dtex]	2 200
Délka [mm]	70
Tahová pevnost [KN]	154
Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	1361

*Tab. 5 – Vlastnosti vláken*



*Obr. 6 – Detail PET vláken*

### **3.2. Proctorova zkouška zhutnění**

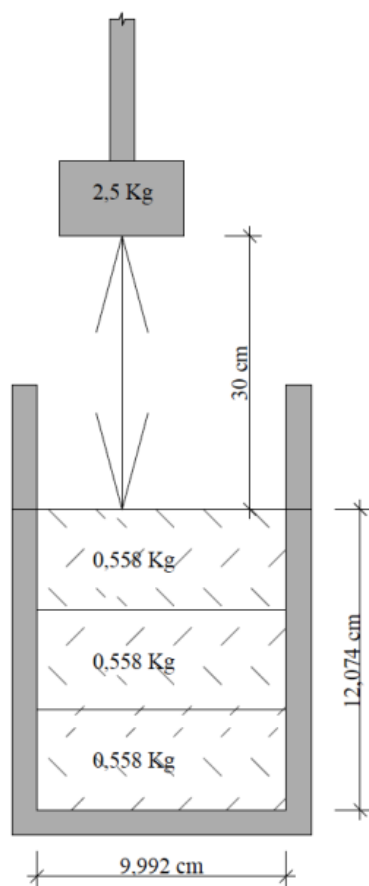
Postup zkoušky dle Návodu k laboratorním cvičením z předmětu Mechanika hornin a zemin na FAST VŠB.

**Pomůcky:** laboratorní váha s přesností na tři desetinná místa, skleněné váženky, sušárna, proctorův přístroj, zhutňovací válec, mísa na míchání vláken

Cílem zkoušky bylo určení závislosti objemové hmotnosti a pórovitosti na obsahu vláken v zemině. Bylo rozhodnuto provést zkoušku při koncentrací vláken v zemině od 0,1% do 1,5% s přírůstkem 0,1%. Bude tedy provedeno celkem 15 zkoušek. Tyto hodnoty byly zvoleny na doporučení Ing.Rubišarové Ph.D.

Z předchozích výsledků bylo známo, že maximální objemová hmotnost zeminy, při vlhkosti 12% je  $1770 \text{ kg/m}^3$ . Z toho vychází výpočet množství zeminy potřebné k naplnění jednoho válce. Zhutňovací válec byl propůjčen Ing. Rubišarovou Ph.D. a byly známy jeho přesné, laboratorně určené, proporce.

**Postup zkoušky:** Byla navážena 1/3 hmotnosti zeminy na jeden válec a 1/3 hmotnosti vláken na jeden válec. Vlákna byla dostatečně rozedrána a v míse pečlivě promíchána se zeminou. Tato směs byla uložena do zhutňovacího válce a 25ti údery zhutněna. Tento proces byl opakován ještě dvakrát. Po zhutnění byl válec vyjmut, očištěn a zvážen. Ze středu válce byl odebrán vzorek zeminy, který byl následně uložen do váženky. Byl kladen důraz na to, aby se v odebraném vzorku nevyskytovala žádná vlákna ani kamínky. Váženka s vlhkou zeminou byla zvážena a umístěna na 48 hodin v sušárně při teplotě  $105^\circ\text{C}$ . Vysušený vzorek byl zvážen a výsledky byly zaznamenány. [10] Všechny získané hodnoty byly zpracovány v programu Microsoft Excel. Vypočítány byly hodnoty maximálních objemových hmotností a pórovitostí u jednotlivých koncentrací.



Obr. 7 – Schéma PS + hmotnost zeminy na jednu vrstvu

### Výpočty (koncentrace vláken 0,1%):

Proporce válce: Hmotnost  $m_c = 2,586 \text{ kg}$ , Objem  $V = 0,0009467 \text{ m}^3$

Hmotnost zeminy na jeden válec:  $m_z = \rho_d \cdot V_v = 1770 \cdot 945,3 \cdot 10^{-6} = 1,675 \text{ kg}$

Hmotnost vláken na jeden válec:  $m_v = m_z \cdot 10^{-3} = 1,675 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

Hmotnostní podíl vláken [%]	Celková hmotnost vláken [g]	Hmotnost vláken na jednu vrstvu [g]
0,1	1,675	0,558
0,2	3,350	1,117
0,3	5,025	1,675
0,4	6,700	2,233
0,5	8,375	2,792
0,6	10,050	3,350
0,7	11,725	3,905
0,8	13,400	4,467
0,9	15,075	5,025
1,0	16,750	5,583
1,1	18,425	6,142
1,2	20,100	6,700
1,3	21,775	7,258
1,4	23,450	7,817
1,5	25,125	8,375

Tab. 6 – Hmotnosti vláken pro PS

Hmotnost zeminy:  $m_s = m_{c+s} - m_c = 4,423 - 2,586 = 1,837 \text{ kg}$

Vlhkost:  $w = \frac{m_w - m_d}{m_d - m_b} \cdot 100 = \frac{41,784 - 40,351}{40,351 - 28,234} \cdot 100 = 11,83\%$

Měrná hmotnost:  $\rho_s = \rho_{s,z} \cdot 0,999 + \rho_{s,pet} \cdot 0,001 = 2680 \cdot 0,999 + 1361 \cdot 0,001 = 2679 \text{ kg/m}^3$

Objemová hmotnost suché zeminy:  $\rho_d = \frac{m_s \cdot (1-w)}{V} = \frac{1,837 \cdot (1-0,1183)}{0,0009467} = 1711 \text{ kg/m}^3$

Pórovitost:  $n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1711}{2679}\right) \cdot 100 = 36,14 \%$

Další výsledky budou prezentovány formou tabulek a grafů:

Obsah vláken [%]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$m_{c+s}$ [kg]	4,423	4,427	4,438	4,427	4,410
$m_s$ [kg]	1,837	1,841	1,852	1,841	1,824
$m_b$ [g]	28,234	31,308	31,473	28,323	29,917
$m_w$ [g]	41,784	54,445	52,183	43,632	66,275
$m_d$ [g]	40,351	52,003	49,990	41,990	62,706
w [%]	11,83	11,80	11,84	12,01	10,90
$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2679	2677	2676	2674	2673
$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1711	1715	1725	1711	1717
n [%]	36,14	35,93	35,55	36,01	35,78

Tab. 7 – Výsledky PS pro obsah vláken 0,1%-0,5%

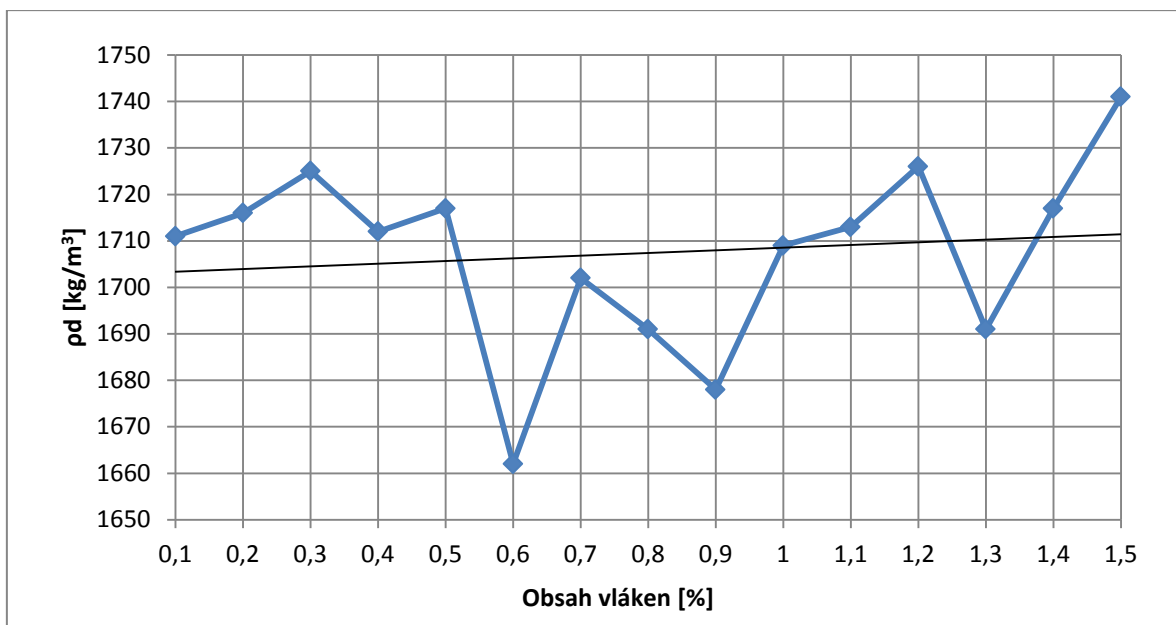
( $m_{c+s}$  – hmotnost válce se zemínou,  $m_c$  – hmotnost zeminy ve válci, n – pórovitost)

Obsah vláken [%]	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$m_c$ [kg]	4,406	4,414	4,412	4,388	4,401
$m_s$ [kg]	1,820	1,828	1,826	1,802	1,815
$m_b$ [g]	27,763	28,399	30,303	28,574	31,473
$m_w$ [g]	39,775	42,965	39,768	36,311	72,933
$m_d$ [g]	38,340	41,418	38,727	35,489	68,86
w [%]	13,57	11,88	12,36	11,89	10,9
$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2672	2671	2669	2668	2667
$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1662	1702	1690	1677	1708
n [%]	37,81	36,30	36,67	37,14	35,95

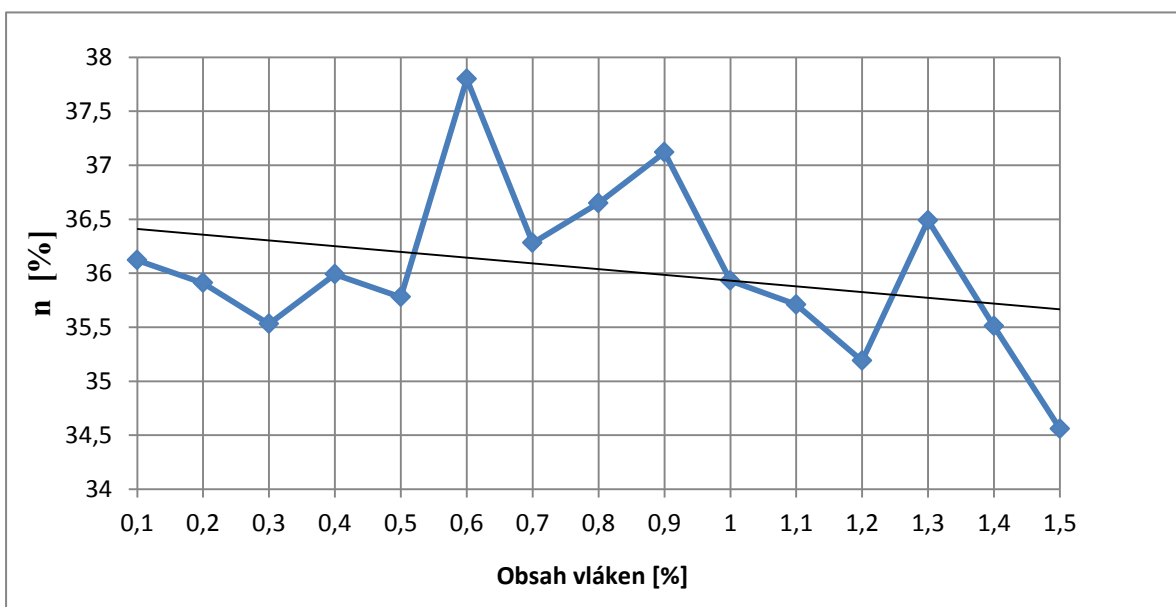
Tab. 8 – Výsledky PS pro obsah vláken 0,6% - 1,0%

Obsah vláken [%]	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$m_c$ [kg]	4,423	4,443	4,402	4,431	4,456
$m_s$ [kg]	1,837	1,857	1,816	1,845	1,87
$m_b$ [g]	28,556	29,918	28,562	30,384	30,358
$m_w$ [g]	41,747	38,574	39,058	42,303	60,073
$m_d$ [g]	40,728	37,325	37,994	41,275	56,913
w [%]	11,73	12,01	11,86	11,94	11,900
$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2665	2664	2663	2662	2660
$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1713	1726	1691	1716	1740
n [%]	35,73	35,21	36,51	35,53	34,58

Tab. 9 – Výsledky PS pro obsah vláken 1,1% - 1,5%



Graf 3 – Zobrazení závislosti obsahu vláken na  $\rho_d$



Graf 4 – Zobrazení závislosti obsahu vláken na pórovitost





*Obr. 8 – Zemina s obsahem vláken 0,5% po PS*



*Obr. 9 – Zemina s obsahem vláken 1,0% po PS*



*Obr. 10 – Zemina s obsahem vláken 1,5% po PS*

### 3.3. Oedometrická zkouška stlačitelnosti

Postup zkoušky dle ČSN ISO/TS 17892-5

**Pomůcky:** laboratorní váha s přesností na tři desetinná místa, edometrický přístroj, edometrický prstenec, CBR přístroj, zhutňovací válec CBR, měřidlo deformace, mísa na míchání, závaží

Cílem zkoušky bylo stanovení závislosti obsahu vláken v zemině na oedometrické moduly zeminy. Měřené koncentrace vláken byly stanoveny na hodnoty 0,5%, 1% a 1,5%. Jako první byla pro porovnání měřena čistá zemina. Byla použita následující řada zatěžovacích stupňů, vycházející z obrázku 11: 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 Mpa. Z důvodu zlepšení a sjednocení výsledků bylo rozhodnuto, že vzorek před zkoušením bude v edometrickém prstenci zhutněn pomocí CBR přístroje.

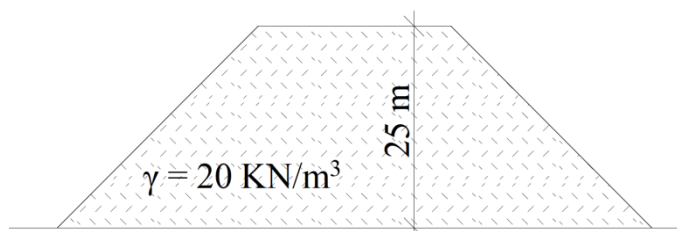
**Postup zkoušky:** Ze spočítaného objemu prstence bylo určeno, že dostačující hmotnost zeminy pro zhutnění do edometrického prstence bude 600g. Prstenec byl vložen do zhutňovacího válce, nasypala se do něho zemina. Dále byla do válce vložena tkanina, aby nebyly poškozeny součástky přístrojů. Po zhutnění 25ti ranami byl prstenec odebrán, zemina začištěna po okraj. Naplněný prstenec se uložil do edometrického přístroje, rameno s měřičem deformací bylo umístěno do příslušné polohy a řádně zafixováno. Vzorek byl postupně zatěžován dle zatěžovací řady od 5 kg závaží. Po ustálení deformace bylo přidáno další závaží. Takto se pokračovalo až do konce zatěžovací řady. Stejným způsobem byla provedena odlehčovací část zkoušky. U dalších vzorků byl postup téměř totožný. Změna byla pouze v přidání a zamíchání příslušného množství vláken do zeminy před uložením do zhutňovacího válce. Vlákná byla dostatečně rozedrána a pečlivě zamíchána do zeminy. Při zvolené hmotnosti 600 g bylo jednoduché dopočítat příslušné hmotnosti vláken na jednotlivé koncentrace.[7] Všechny deformace byly zaznamenány a výsledky zpracovány v programu Microsoft Excel.

Velikosti normálových zatížení vychází z modelové situace znázorněné na obrázku 11.

$$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$$

$$h = 25\text{m}$$

$$\sigma = \gamma \cdot h = 20 \cdot 25 = 0,5 \text{ MPa}$$



Obr. 11 – Schéma zatížení pro oedometrickou zkoušku



### Výpočty (obsah vláken 1%):

Hmotnost vláken pro koncentraci 1,0%:  $m_v = m_z \cdot 10^{-3} = 600 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ g}$

Hmotnostní podíl vláken [%]	Celková hmotnost vláken [g]
0,5	3,0
1	6,0
1,5	9,0

Tab. 10 – Hmotnosti vláken pro oedometrickou zkoušku

Poměrná přetvoření:

$$\varepsilon_{0,05} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,070}{3,3} = 0,021$$

$$\varepsilon_{0,50} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,190}{3,3} = 0,361$$

$$\varepsilon_{0,10} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,070}{3,3} = 0,055$$

$$\varepsilon_{0,40} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,185}{3,3} = 0,359$$

$$\varepsilon_{0,15} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,360}{3,3} = 0,109$$

$$\varepsilon_{0,30} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,160}{3,3} = 0,352$$

$$\varepsilon_{0,20} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,540}{3,3} = 0,164$$

$$\varepsilon_{0,20} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,120}{3,3} = 3,39$$

$$\varepsilon_{0,30} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,800}{3,3} = 0,242$$

$$\varepsilon_{0,15} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,096}{3,3} = 0,332$$

$$\varepsilon_{0,40} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,022}{3,3} = 0,310$$

$$\varepsilon_{0,10} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,049}{3,3} = 0,318$$

$$\varepsilon_{0,50} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{1,190}{3,3} = 0,361$$

$$\varepsilon_{0,05} = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,965}{3,3} = 0,292$$

Zatěžovací moduly přetvárnosti:

$$E_{\text{oed.}}^{0,05-0,10} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,10 - 0,05}{0,055 - 0,021} = 1,471 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,1-0,15} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,15 - 0,10}{0,109 - 0,055} = 0,926 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,15-0,2} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,20 - 0,15}{0,164 - 0,109} = 0,909 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,2-0,3} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,3 - 0,2}{0,242 - 0,164} = 1,282 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,3-0,4} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,4 - 0,3}{0,310 - 0,242} = 1,471 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,4-0,5} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,5-0,4}{0,361-0,310} = 1,961 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,05-0,5} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,5-0,05}{0,361-0,021} = 1,324 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{\text{oed}(+)} &= \frac{E^{0,05-0,1} + E^{0,1-0,15} + E^{0,15-0,2} + E^{0,2-0,3} + E^{0,3-0,4} + E^{0,4-0,5}}{5} = \\ &= \frac{1,471+0,926+0,909+1,282+1,471+1,961}{5} = 1,337 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Odlehčovací moduly přetvárnosti:

$$E_{\text{oed.}}^{0,5-0,4} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,5-0,4}{0,361-0,359} = 50,000 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,4-0,3} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,4-0,3}{0,359-0,352} = 14,286 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,3-0,2} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,3-0,2}{0,352-0,339} = 7,692 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,2-0,15} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,2-0,15}{0,339-0,332} = 7,143 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,15-0,1} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,15-0,1}{0,332-0,318} = 3,571 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{oed.}}^{0,1-0,05} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,1-0,05}{0,318-0,292} = 1,923 \text{ MPa}$$

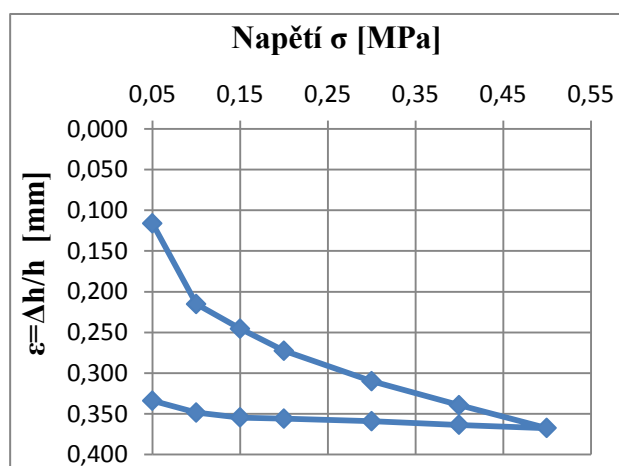
$$E_{\text{oed.}}^{0,5-0,05} = \frac{\sigma_i + 1 - \sigma_i}{\varepsilon_i + 1 - \varepsilon_i} = \frac{0,5-0,05}{0,361-0,292} = 6,523 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{\text{oed}(-)} &= \frac{E^{0,5-0,4} + E^{0,4-0,3} + E^{0,3-0,2} + E^{0,2-0,15} + E^{0,15-0,1} + E^{0,1-0,05}}{5} = \\ &= \frac{50,000+14,286+7,692+7,143+3,571+1,923}{5} = 14,103 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Další výsledky budou prezentovány formou tabulek a grafů:

Čistá zemina		
Napětí $\sigma$ [MPa]	$\Delta h$ [mm]	$\varepsilon = \Delta h/h$
0,05	0,383	0,116
0,10	0,710	0,215
0,15	0,810	0,245
0,20	0,900	0,273
0,30	1,023	0,310
0,40	1,120	0,339
0,50	1,213	0,368
0,40	1,200	0,364
0,30	1,185	0,359
0,20	1,175	0,356
0,15	1,170	0,355
0,10	1,150	0,348
0,05	1,102	0,334

Tab. 11 – Poměrná přetvoření – čistá zemina



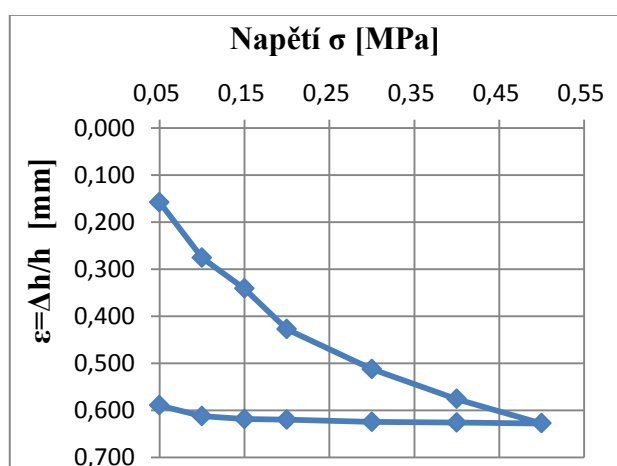
Graf 5 – Křivka stlačitelnosti – čistá zemina

$E_{\text{oed}(+)} \text{ [MPa]}$	$E_{\text{oed}(-)} \text{ [MPa]}$
$E^{0,05-0,1}=0,505$	$E^{0,5-0,4}=25,000$
$E^{0,1-0,15}=1,667$	$E^{0,4-0,3}=20,000$
$E^{0,15-0,2}=1,786$	$E^{0,3-0,2}=33,333$
$E^{0,2-0,3}=2,703$	$E^{0,2-0,15}=50,000$
$E^{0,3-0,4}=3,448$	$E^{0,15-0,1}=7,143$
$E^{0,4-0,5}=3,448$	$E^{0,1-0,05}=3,571$
<b><math>E^{0,05-0,5}=1,786</math></b>	<b><math>E^{0,05-0,5}=13,235</math></b>
<b><math>\phi E_{\text{oed}}=3,448</math></b>	<b><math>\phi E_{\text{oed}}=23,175</math></b>

Tab. 12 – Výsledné oedometrické moduly – čistá zemina

Obsah vláken 0,5 %		
Napětí $\sigma$ [MPa]	$\Delta h$ [mm]	$\varepsilon = \Delta h/h$
0,05	0,520	0,158
0,10	0,910	0,276
0,15	1,125	0,341
0,20	1,410	0,427
0,30	1,690	0,512
0,40	1,900	0,576
0,50	2,070	0,627
0,40	2,065	0,626
0,30	2,060	0,624
0,20	2,045	0,620
0,15	2,040	0,618
0,10	2,020	0,612
0,05	1,945	0,589

Tab. 13 – Poměrná přetvoření – zemina s obsahem vláken 0,5%



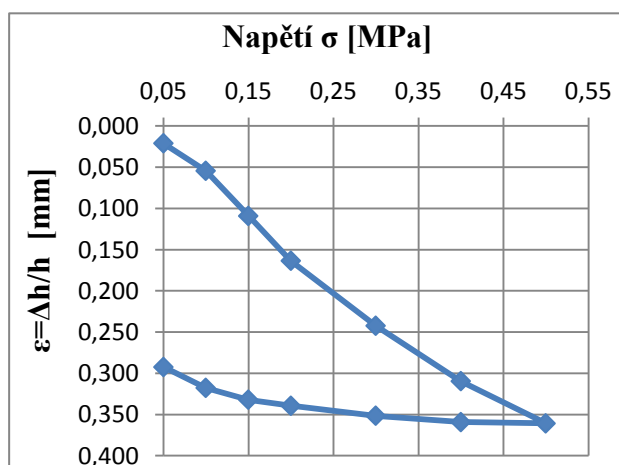
Graf 6 – Křivka stlačitelnosti – zemina s obsahem vláken 0,5%

Eedom(+) [MPa]	Eedom(-) [MPa]
$E^{0,05-0,1}=0,424$	$E^{0,5-0,4}=100,000$
$E^{0,1-0,15}=0,769$	$E^{0,4-0,3}=50,000$
$E^{0,15-0,2}=0,581$	$E^{0,3-0,2}=25,000$
$E^{0,2-0,3}=1,176$	$E^{0,2-0,15}=25,000$
$E^{0,3-0,4}=1,563$	$E^{0,15-0,1}=8,333$
$E^{0,4-0,5}=1,961$	$E^{0,1-0,05}=2,174$
<b><math>E^{0,05-0,5}=0,959</math></b>	<b><math>E^{0,05-0,5}=0,019</math></b>
<b><math>\sigma E_{oed}=1,079</math></b>	<b><math>\sigma E_{oed}=35,085</math></b>

Tab. 14 – Výsledné oedometrické moduly – zemina s obsahem vláken 0,5%

Obsah vláken 1,0 %		
Napětí $\sigma$ [MPa]	$\Delta h$ [mm]	$\varepsilon = \Delta h/h$
0,05	0,070	0,021
0,10	0,180	0,055
0,15	0,360	0,109
0,20	0,540	0,164
0,30	0,800	0,242
0,40	1,022	0,310
0,50	1,190	0,361
0,40	1,185	0,359
0,30	1,160	0,352
0,20	1,120	0,339
0,15	1,096	0,332
0,10	1,049	0,318
0,05	0,965	0,292

Tab. 15 - Poměrná přetvoření – zemina s obsahem vláken 1,0%



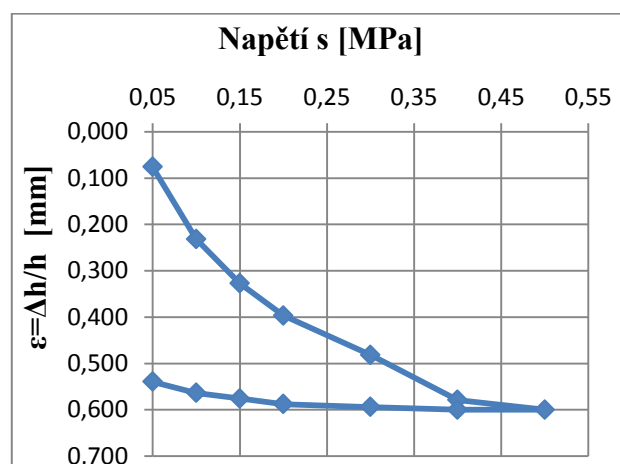
Graf 7 - Křivka stlačitelnosti – zemina s obsahem vláken 1,0%

Eedom(+) [MPa]	Eedom(-) [MPa]
$E^{0,05-0,1}=1,471$	$E^{0,5-0,4}=50,000$
$E^{0,1-0,15}=0,926$	$E^{0,4-0,3}=14,286$
$E^{0,15-0,2}=0,909$	$E^{0,3-0,2}=7,692$
$E^{0,2-0,3}=1,282$	$E^{0,2-0,15}=7,143$
$E^{0,3-0,4}=1,471$	$E^{0,15-0,1}=3,571$
$E^{0,4-0,5}=1,961$	$E^{0,1-0,05}=1,923$
<b><math>E^{0,05-0,5}=1,324</math></b>	<b><math>E^{0,05-0,5}=6,523</math></b>
<b><math>\phi E_{\text{oed}}=1,337</math></b>	<b><math>\phi E_{\text{oed}}=14,103</math></b>

Tab. 16 - Výsledné oedometrické moduly – zemina s obsahem vláken 1,0%

Obsah vláken 1,5 %		
Napětí $\sigma$ [MPa]	$\Delta h$ [mm]	$\varepsilon = \Delta h/h$
0,05	0,250	0,076
0,10	0,765	0,232
0,15	1,080	0,327
0,20	1,310	0,397
0,30	1,590	0,482
0,40	1,910	0,579
0,50	1,980	0,600
0,40	1,980	0,600
0,30	1,960	0,594
0,20	1,940	0,588
0,15	1,900	0,576
0,10	1,860	0,564
0,05	1,780	0,539

Tab. 17 - Poměrná přetvoření – zemina s obsahem vláken 1,5%



Graf 8 - Křivka stlačitelnosti – zemina s obsahem vláken 1,5%

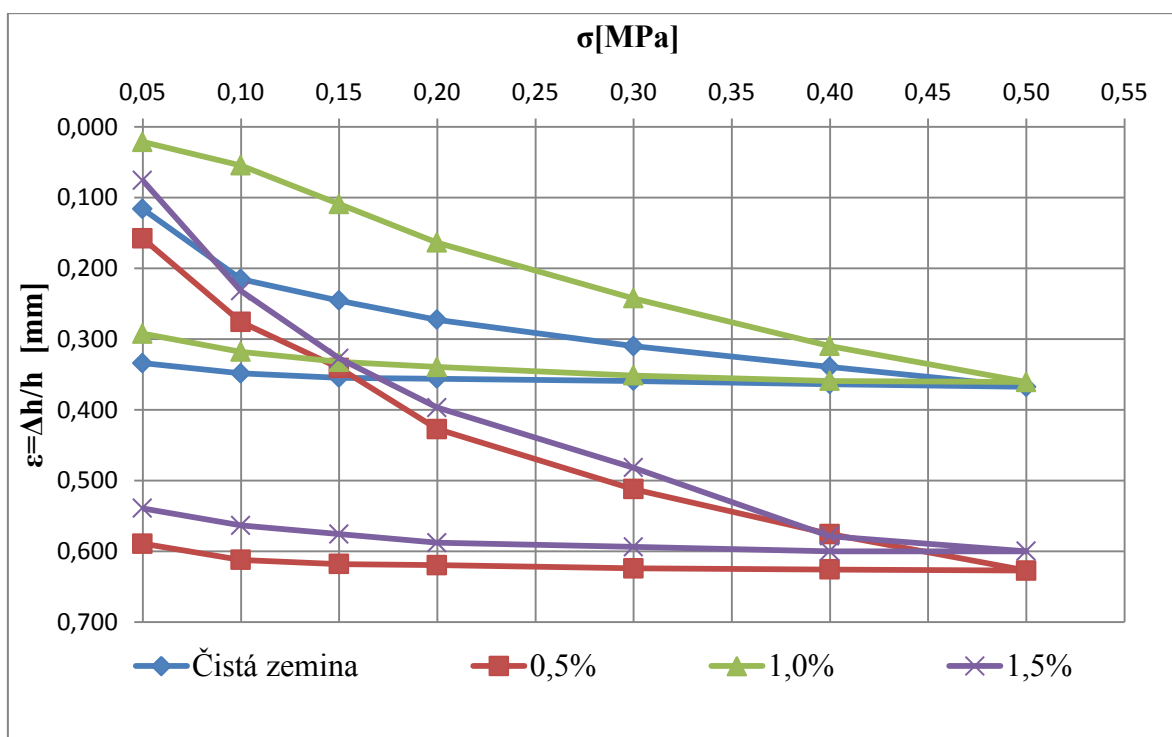
E <sub>edom(+)</sub> [MPa]	E <sub>edom(-)</sub> [MPa]
E <sup>0,05-0,1</sup> =0,321	E <sup>0,5-0,4</sup> = /
E <sup>0,1-0,15</sup> =0,526	E <sup>0,4-0,3</sup> =16,667
E <sup>0,15-0,2</sup> =0,714	E <sup>0,3-0,2</sup> =16,667
E <sup>0,2-0,3</sup> =1,176	E <sup>0,2-0,15</sup> =4,167
E <sup>0,3-0,4</sup> =1,031	E <sup>0,15-0,1</sup> =4,167
E <sup>0,4-0,5</sup> =4,762	E <sup>0,1-0,05</sup> =2,000
<b>E<sup>0,05-0,5</sup>=0,589</b>	<b>E<sup>0,05-0,5</sup>=7,377</b>
<b>σE=1,422</b>	<b>σE=8,734</b>

Tab. 18- Výsledné oedometrické moduly – zemina s obsahem vláken 1,5%

### Porovnání výsledků:

	$E^{0,05-0,5}$		$\bar{E}_{oed}$	
	$E_{oed(+)} [MPa]$	$E_{oed(-)} [MPa]$	$E_{oed(+)} [MPa]$	$E_{oed(-)} [MPa]$
0,0%	1,786	13,235	3,448	23,175
0,5%	0,959	0,019	1,079	35,085
1,0%	1,324	6,523	1,337	14,103
1,5%	0,589	7,377	1,422	8,734

Tab. 19 – Shrnutí výsledných oedometrických modulů



Graf 9 – Porovnání křivek stlačitelnosti

### 3.4. Smyková krabicová zkouška

Postup zkoušky dle ČSN ISO/TS 17892-10

**Pomůcky:** laboratorní váha s přesností na tři desetinná místa, automatizovaný mechanický smykový přístroj Fröwag, stolní počítač, mísa na míchání vláken.

Cílem zkoušky bylo určení závislosti velikosti úhlu vnitřního tření a soudržnosti na obsahu vláken v zemině. Z důvodu kompatibility s ostatními zkouškami byly zvoleny stejné obsahy vláken jako u oedometrické zkoušky, takže jsme užili koncentrace 0,5%, 1% a 1,5%. Zatěžovací stupně byly určeny na hodnoty 0.05, 0.1, 0.2 MPa dle obrázku 12.

**Postup zkoušky:** Byly změřeny rozměry čtvercové smykové krabice. Z nich byl spočítán objem krabice, potřebný k určení hmotnosti zeminy na jednu zkoušku a příslušného množství vláken. Zkouška byla prováděna na smykači značky Fröwag, přímo napojeném na počítač. Nejdříve byl měřen vzorek čisté zeminy. Naváženo bylo 0,460 kg zeminy, která byla rovnoměrně uložena do smykové krabice. Do krabice bylo uloženo víko s roznášecí destičkou. Všechny šrouby zajišťující přenos vodorovného napětí bylo nutno řádně utáhnout. Měřidlo, měřící normálovou deformaci bylo připevněno mezi roznášecí destičku a rameno přenášející zatížení od závaží. Na vnější konec tohoto ramene bylo uloženo první závaží. Rameno bylo odjištěno a současně v počítačovém programu UniProt spuštěno měření. Na přístroji byl nastaven posun 0,5 mm za jednu sekundu. Zkouška trvala přibližně hodinu. Po ukončení byla smyková krabice otevřena, vyčištěna od zeminy a byl uložen další vzorek, měřený s větším normálovým zatížením. Tento postup byl dodržován u všech vzorků.[8] Software zaznamenával hodnoty, smykové síly, vodorovného a normálového posunu v závislosti na čase. Výstupy z tohoto programu byly převedeny do programu Microsoft Excel. Nejdůležitější hodnotou byla maximální smyková síla působící na vzorek, která byla využita k dalším výpočtům. Hodnoty úhlu vnitřního tření a soudržnosti zeminy byly získány z rovnice regresní křivky.



### Výpočty:

Objem krabice:  $V = 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,026 = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

Hmotnost zeminy na jednu zkoušku:  $m_z = V \cdot \rho_d = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 1770 = 0,460 \text{ Kg}$

Hmotnost vláken pro koncentraci 1,0%:  $m_v = m_z \cdot 10^{-3} = 460 \cdot 10^{-3} = 4,6 \text{ g}$

Hmotnostní podíl vláken [%]	Celková hmotnost vláken [g]
0,5	2,3
1	4,6
1,5	6,9

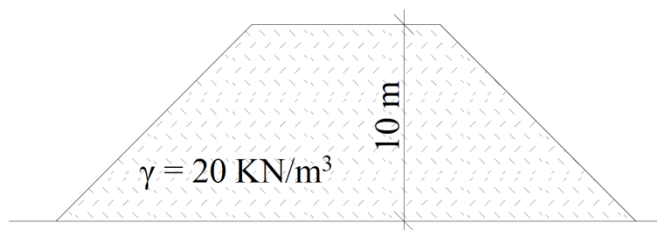
Tab. 20 – Hmotnosti vláken pro smykovou krabicovou zkoušku

Velikosti normálových zatížení vychází z modelové situace znázorněné na obrázku 12.

$$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$$

$$h = 10 \text{ m}$$

$$\sigma = \gamma \cdot h = 20 \cdot 10 = 0,2 \text{ MPa}$$



Obr. 12 – Schéma zatížení pro smykovou krabicovou zkoušku

### Příklad výpočtů napětí na čisté zemině:

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} = \frac{0,5}{0,1 \cdot 0,1} = 50 \text{ KPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} = \frac{1,0}{0,1 \cdot 0,1} = 100 \text{ KPa}$$

$$\sigma_3 = \frac{N}{A} = \frac{2,0}{0,1 \cdot 0,1} = 200 \text{ KPa}$$

$$\tau_1 = \frac{T}{A} = \frac{0,04}{0,1 \cdot 0,1} = 4 \text{ KPa}$$

$$\tau_2 = \frac{T}{A} = \frac{0,6}{0,1 \cdot 0,1} = 60 \text{ KPa}$$

$$\tau_3 = \frac{T}{A} = \frac{1,07}{0,1 \cdot 0,1} = 107 \text{ KPa}$$

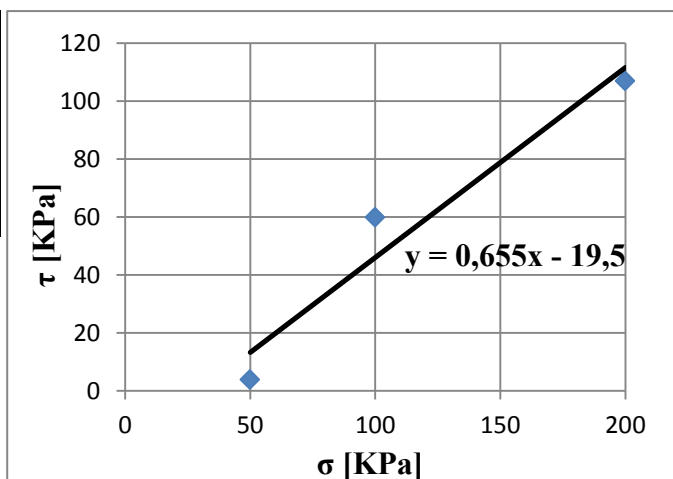
Čistá zemina			
N [kN]	$\sigma$ [kPa]	T [kN]	$\tau$ [kPa]
0,5	50	0,04	4
1,0	100	0,6	60
2,0	200	1,07	107

Tab. 21 – Výsledky smykové krabicové zkoušky – čistá zemina

$c = 0$  kPa

$\tan \varphi = 0,655$

$\varphi = 33,22^\circ$



Graf 10 – Mohrova obalová čára-čistá zemina

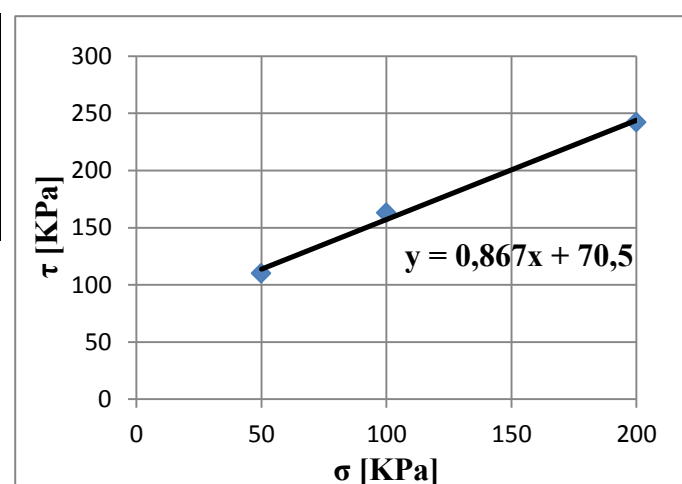
Obsah vláken 0,5%			
N [kN]	$\sigma$ [kPa]	T [kN]	$\tau$ [kPa]
0,5	50	1,1	110
1,0	100	1,63	163
2,0	200	2,42	242

Tab. 22 – Výsledky smykové krabicové zkoušky – zemina + 0,5% vláken

$c = 70,5$  kPa

$\tan \varphi = 0,867$

$\varphi = 40,93^\circ$



Graf 11 – Mohrova obalová čára-zemina+0,5% vláken

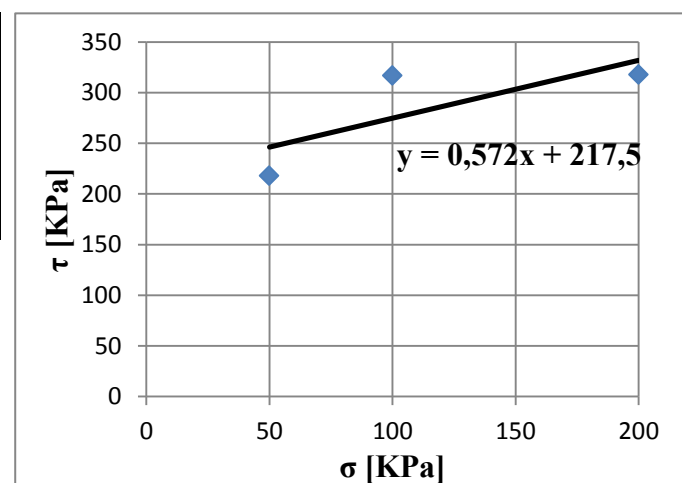
Obsah vláken 1,0%			
N [kN]	$\sigma$ [kPa]	T [kN]	$\tau$ [kPa]
0,5	50	3,17	218
1,0	100	2,18	317
2,0	200	3,18	318

Tab. 23 - Výsledky smykové krabicové zkoušky – zemina + 1,0% vláken

$c = 217,5$  kPa

$\tan \varphi = 0,572$

$\varphi = 29,77^\circ$



Graf 12 – Mohrova obalová čára-zemina + 1,0% vláken

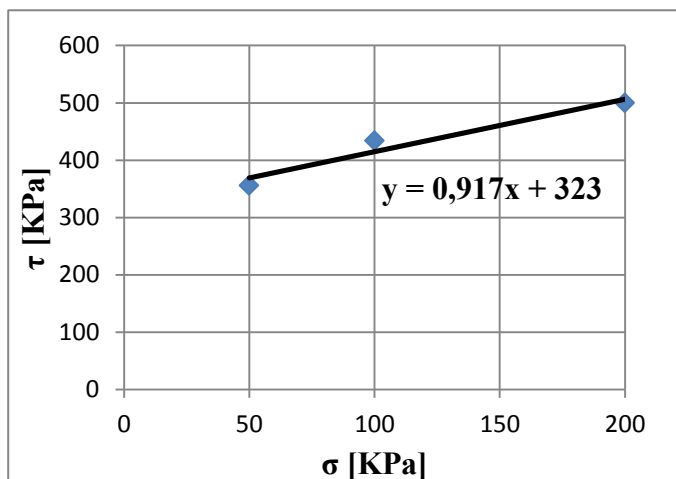
Obsah vláken 1,5%			
N [kN]	$\sigma$ [kPa]	T [kN]	$\tau$ [kPa]
0,5	50	3,56	356
1,0	100	4,34	434
2,0	200	5	500

Tab. 24 – Výsledky smykové krabicové zkoušky – zemina + 1,5% vláken

$c = 323 \text{ kPa}$

$\tan \varphi = 0,917$

$\varphi = 42,52^\circ$

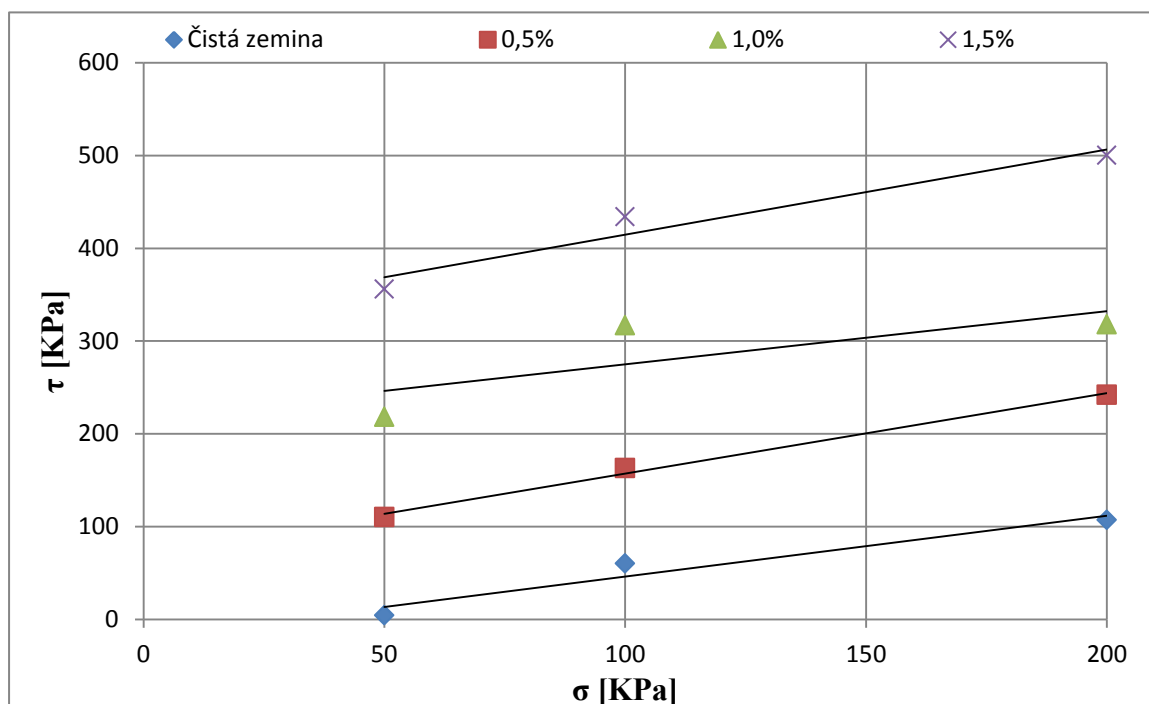


Graf 13 – Mohrova obalová čára-zemina + 1,5% vláken

### Shrnutí výsledků:

Obsah vláken [%]	0,0	0,5	1,0	1,5
$c$ [kPa]	0	70,5	217,5	323
$\varphi$ [°]	33,22	40,93	29,77	42,52

Tab. 25 – Výsledné soudržnosti a úhly vnitřního tření



Graf 14 – Porovnání mohrových obalových křivek

## **4. Vyhodnocení dosažených výsledků**

### **4.1 Proctorova zkouška zhutnění**

Vyztužovaná zemina nevykazuje znatelné zlepšení, ale podle regresní křivky objemová hmotnost suché zeminy stoupá. Pórovitost zákonitě klesá. Možné nepřesnosti při měření mohl zavinit výskyt kamínků v měřené zemině. Jejich výskyt mohl ovlivnit hmotnost válce po proctorově zkoušce a tím celkový výsledek. V budoucnu by se této nepřesnosti mohlo předejít rozemletím zkoušené zeminy.

### **4.2 Oedometrická zkouška**

Z výsledků jednoznačně vyplývá, že přidáním vláken se oedometrické moduly zhoršují. Pouze u vzorku vyztuženého jedním procentem vláken se výsledky liší od zbývajících dvou vzorků vyztužené zeminy. Tato zřejmá chyba je přičítána nepřesnosti při zarovnání zhutněného vzorku. Prakticky by mohla být vlákna využita v případě, že by bylo potřeba zeminu stlačit víc než by v neupraveném stavu dovolovala.

### **4.3 Smyková krabicová zkouška**

S rostoucím množstvím vláken se smyková pevnost zeminy výrazně zvyšuje. Ovšem podle dosažených výsledků by se pevnost zeminy s 1,5% odpovídala spíš pevnosti skalní horniny, což je určitě nereálné. Důvodem, proč byly naměřeny takto vysoké hodnoty je nejspíš velikost smykové krabice (0,1m . 0,1m . 0,026m). Vlákná délky 70 mm budou v této krabici zasahovat do smykové plochy mnohem více než by zasahovali při reálném použití. Těmto okolnostem by bylo možno předejít využitím smykového přístroje s podstatně větší smykovou krabicí.

## **5. Závěr**

Rozptýlenou výztuž je možno považovat za velmi zajímavou, ovšem stále málo prozkoumanou metodu. Smícháním zeminy s vlákny je možno dosáhnout příznivých výsledků, především u pevnostních parametrů. Ekologičnost a ekonomičnost přidává tomuto řešení na perspektivě.

V budoucnu bych se touto tematikou rád podrobněji zabýval a rozšířil výzkum i na terénní zkoušku. Do laboratoře geotechniky na fakultě stavební přibude mlýn na zeminu, kterého by se dalo využít ke zpřesnění výsledků zkoušek. Všechny zkoušky bych rád provedl ve větším množství a získal tak směrodatnější závěry.

## Seznam použité literatury a informačních zdrojů:

Knihy a dokumenty:

- [1] ISABEL M. ,PINTO M. *MICRO-REINFORCED SOIL.3<sup>rd</sup> Internacional Conference on Ground improvement techniques.*25-26 September 2000, Singapore
- [2] RUBIŠAROVÁ HELENA . *THE POSSIBILITY OF SOIL IMPROVEMENT BY THE RANDOM REINFORCEMENT METHOD.*Ostrava, 2010.
- [3] TELFORD THOMAST, *THE PRACTICE OF SOIL REINFORCING IN EUROPE*, 1995,ISBN: 0 7277 2082 X

Normy :

- [4] ČSN EN ISO 14688-2, *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování zemin – Část 2: Zásady pro zatřídování*, Březen 2005
- [5] ČSN CEN ISO/TS 17892-1, *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 1: Stanovení vlhkosti zemin*, Duben 2005
- [6] ČSN CEN ISO/TS 17892-4, *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4 : Stanovení zrnitosti zemin*, Duben 2005
- [7] ČSN CEN ISO/TS 17892-5, *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 5: Stanovení stlačitelnosti zemin v edometru*, Duben 2005
- [8] ČSN CEN ISO/TS 17892-10, *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 10: Krabicová smyková zkouška*, Duben 2005

Internet:

- [9] RUBIŠAROVÁ, Helena a František KRESTA. Asb-portal: využití rozptýlené výztuže při úpravě vlastností zemin. Wwww.asb-portal.cz [online]. 2009 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z WWW: <http://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/geotechnika/moznost-vyuziti-rozptylene-vyztuze-pri-uprave-vlastnosti-zemin-1338.html>
- [10] *Postup zkoušky dle Návodu k laboratorním cvičením z předmětu Mechanika hornin a zemin na FAST VŠB.* Dostupné z WWW:  
<<http://homel.vsb.cz/~pet346/MHZ/letni2012/Navody%20do%20laboratore.pdf>>

[11] Studentsoftheworld. [Www.studentsoftheworld.info](http://www.studentsoftheworld.info) [online]. 2011 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.studentsoftheworld.info/sites/country/al-zobai.php>

## **Seznam obrázků:**

Obr. 3 - Zikkurat v Dur-Kurigalzu [11]

Obr. 4 – Rozmístění vláken [2]

Obr. 3 – Míchání vláken [2]

Obr. 4 – Zarovnání zeminy [2]

Obr. 5 – Hutnění zeminy [2]

Obr. 6 – Detail PET vláken (vlastní fotodokumentace)

Obr. 7 – Schéma PS + hmotnost zeminy na jednu vrstvu (vlastní nákres)

Obr. 8 – Zemina s obsahem vláken 0,5% po PS (vlastní fotodokumentace)

Obr. 9 – Zemina s obsahem vláken 1,0% po PS (vlastní fotodokumentace)

Obr. 10 – Zemina s obsahem vláken 1,5% po PS (vlastní fotodokumentace)

Obr. 11 – Schéma zatížení pro oedometrickou zkoušku (vlastní nákres)

Obr. 12 – Schéma zatížení pro smykovou krabicovou zkoušku (vlastní nákres)



## **Seznam tabulek:**

Tab. 10 – Výsledky prosévací zkoušky

Tab. 11 – Zatřídění zeminy

Tab. 12 – Výsledky kompletní proctorovy zkoušky

Tab. 13 – Určení vlhkosti

Tab. 14 – Vlastnosti vláken

Tab. 15 – Hmotnosti vláken pro PS

Tab. 16 – Výsledky PS pro obsah vláken 0,1%-0,5%

Tab. 17 – Výsledky PS pro obsah vláken 0,6% - 1,0%

Tab. 9 – Výsledky PS pro obsah vláken 1,1% - 1,5%

Tab. 18 – Hmotností vláken pro oedometrickou zkoušku

Tab. 19 – Poměrné přetvoření – čistá zemina

Tab. 20 – Výsledné oedometrické moduly – čistá zemina

Tab. 13 – Poměrná přetvoření – zemina s obsahem vláken 0,5%

Tab. 14 – Výsledné oedometrické moduly – zemina s obsahem vláken 0,5%

Tab. 15 - Poměrná přetvoření – zemina s obsahem vláken 1,0%

Tab. 16 - Výsledné oedometrické moduly – zemina s obsahem vláken 1,0%

Tab. 17 - Poměrná přetvoření – zemina s obsahem vláken 1,5%

Tab. 18- Výsledné oedometrické moduly – zemina s obsahem vláken 1,5%

Tab. 121 – Shrnutí výsledných oedometrických modulů

Tab. 20 – Hmotnosti vláken pro smykovou krabicovou zkoušku

Tab. 21 – Výsledky smykové krabicové zkoušky – čistá zemina

Tab. 22 – Výsledky smykové krabicové zkoušky – zemina + 0,5% vláken

Tab. 23 - Výsledky smykové krabicové zkoušky – zemina + 1,0% vláken

Tab. 24 – Výsledky smykové krabicové zkoušky – zemina + 1,5% vláken

Tab. 25 – Výsledné soudržnosti a úhly vnitřního tření

## **Seznam grafů:**

Graf 3 – Křivka zrnitosti

Graf 4 – Výsledky kompletní proctorovy zkoušky zeminy

Graf 3 – Zobrazení závislosti obsahu vláken na  $\rho_d$

Graf 4 – Zobrazení závislosti obsahu vláken na pórovitost

Graf 5 – Křivka stlačitelnosti – čistá zemina

Graf 6 – Křivka stlačitelnosti – zemina s obsahem vláken 0,5%

Graf 7 - Křivka stlačitelnosti – zemina s obsahem vláken 1,0%

Graf 8 - Křivka stlačitelnosti – zemina s obsahem vláken 1,5%

Graf 9 – Porovnání křivek stlačitelnosti

Graf 10 – Mohrova obalová čára-čistá zemina

Graf 11 – Mohrova obalová čára-zemina+0,5% vláken

Graf 12 – Mohrova obalová čára-zemina + 1,0% vláken

Graf 13 – Mohrova obalová čára-zemina + 1,5% vláken

Graf 14 – Porovnání mohrových obalových křivek

## **Poděkování :**

Uctivě děkuji doc. Dr. Ing. Hynku Lahutovi za odborné vedení této práce a celoroční ochotu ke konzultaci.

Dále děkuji Ing. Heleně Rubišarové Ph.D. za poskytnuté materiály a ochotu k poskytnutí jakékoli rady při řešení daného tématu.

Za poskytování prostoru v laboratoři a mnoho předaných zkušeností při provádění zkoušek děkuji panu Ivu Knápkovi.

Firmě Kovovýroba – Karel Václav z Velichovek děkuji za upravení součástky k laboratornímu lisu.

Děkuji celé své rodině za hmotné i duševní zabezpečení mého vzdělání.